

# ロート試験を用いたフレッシュコンクリートの自己充填性評価

小沢一雅\*・坂田 昇\*\*・岡村 甫\*\*\*

自己充填コンクリートを製造・施工する場合、その充填性評価及び配合設計手法の確立の観点からコンクリートの自己充填性を評価する試験方法の確立が重要である。そこで、充填性を評価する上で重要であると考えられるコンクリートの間隙通過のしやすさを本研究で提案したV型ロート試験で評価することを試みた。その結果、コンクリートの変形性をスランブフローで、また、間隙通過のしやすさをV型ロート試験の流下速度で評価した場合、この両者によって一般的な配筋部における自己充填性を概ね評価できることが分った。

**Key Words** : high performance concrete, funnel test, fresh concrete, self-compactability

## 1. 序 論

東京大学において開発された「自己充填性ハイパフォーマンスコンクリート」<sup>1),2)</sup>はフレッシュ、材令初期及び硬化後の3つの状態で次のように定義される。フレッシュな状態においては変形性に優れているばかりでなく十分な材料分離抵抗性を持ち、パイプレータを使用することなく型枠内に打込むことができる。材令初期においては硬化収縮や水和による発熱が少なく、また乾燥収縮を小さく抑え、これらによる初期欠陥を生じにくい特性を持つ。硬化後においては、外部から侵入しようとする塩素イオンや炭酸ガス等の環境要因に対して十分な抵抗性を持ち、緻密な微細構造を構築する。

このうち、フレッシュな状態における締固め不要の自己充填性は、コンクリートが自重によって型枠内の隅々まで詰まる性能を表わしハイパフォーマンスコンクリートに要求される性能の中でも最も重要な項目である。ポンプ圧送等によって型枠の上部に運ばれたコンクリートは、一般に配筋された型枠内を落下し、自重によって水平方向へ流動して鉄筋の間を通過し、必要に応じて流動方向を変化させながら型枠内に充填していく。充填性はこれらを総合的に表わすものであり、この自己充填性を試験によって定量的に評価することができれば締固め不要であるかどうかを打設前に確認することができる。また、自己充填コンクリートの一般的な配合設計手法を確立する上でも自己充填性の評価は重要である。本研究では、コンクリートを型枠内に打設した際に、そのコンクリートがどのように充填するかが推定できる試験方法を

考案することを目的とし実験的な検討を行った。

## 2. 既往の研究

自己充填コンクリートを含む、スランブ24 cmを超えるようなコンクリートに対して、その流動性を評価するものとしてスランブフロー試験が広く用いられている。しかし、スランブフロー試験だけでは自己充填性を的確に評価することができないことが多くの研究者によって明らかにされている<sup>3)</sup>。このようなことから、コンクリートの自己充填性を評価する試験方法について様々な実験及び机上検討が行われている。そこで、まず代表的な評価試験について、その結果が何を測定し、何を評価しているのか、即ち充填性評価法としての評価を行った。

### (1) スランブフロー試験

スランブフロー試験は土木学会規準の試験で、コンクリートの自重による力で、底面での摩擦を受けながら外部からの拘束を受けない条件でコンクリートが変形する能力を判定する試験であり、従来からコンクリートの流動性を評価するための試験として用いられている方法である。したがってコンクリート打込み時における流動勾配や流動距離を評価するのに適切な試験である(図-1)。比較的障害物が少ないところにコンクリートを打設した既往の実験において、そのコンクリートの流動勾配や充填性とスランブフローが高い相関のあることから明らかである<sup>3)</sup>(図-2)。しかし、スランブフロー試験は、自由表面が大きく、外部からの拘束が小さい条件下における変形性を測定しているので、例えば、鉄筋の間を通過する能力は判定できない。同じスランブフローを有するコンクリートであっても配合条件などによって鉄筋等の障害物を通過する能力が異なるものが存在する<sup>2)</sup>。

### (2) 鉄筋が密に多数配置されている型枠内に充填する試験

図-3に示す試験<sup>4)</sup>は、自己充填性ハイパフォーマンス

\* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科  
(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

\*\* 正会員 工修 東京大学受託研究員(鹿島技術研究所第二研究部)

\*\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

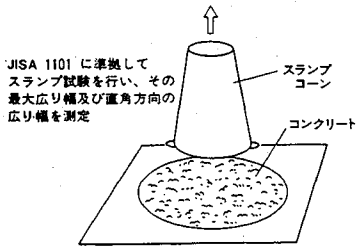


図-1 スランプフロー試験

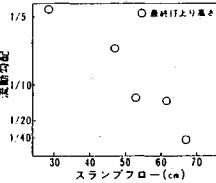


図-2 既往の実験<sup>3)</sup>におけるスランプフローと流動勾配の関係

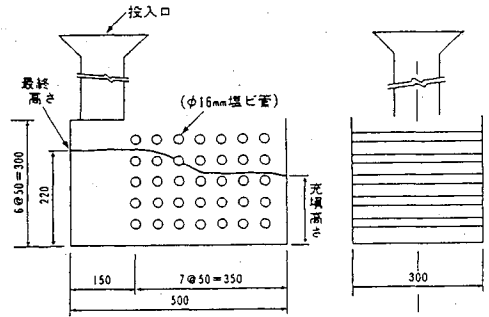


図-4 充填性試験<sup>5)</sup>

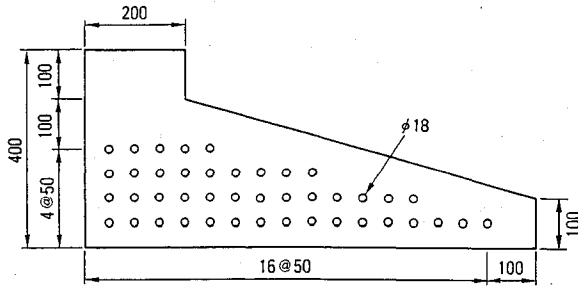


図-3 充填性試験 (ハイパフォーマンスコンクリート開発用)<sup>4)</sup>

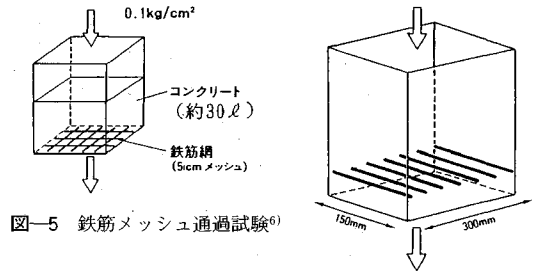


図-5 鉄筋メッシュ通過試験<sup>6)</sup>

図-6 平行鉄筋間隙通過試験<sup>7)</sup>

スコンクリートの開発段階において用いられた評価方法であり、鉄筋が密に多数配置されている型枠内におけるコンクリートの流動状況を目視観察し、この型枠内に完全に充填された場合に、締め固め不要の自己充填コンクリートであると判断するのに用いられたものである。したがって、基本的にはコンクリートの充填性を定量的に自己評価するものではない。

この試験方法を応用した試験として、図-4に示す試験<sup>5)</sup>がある。これは鉄筋の間を水平方向に通過する能力のみに着目した試験であり、流動先端部のコンクリート高さ等によって定量的に自己充填性を評価することを試みたものである。

これらの試験は、ともに鉄筋の間を通過していく能力と自重による水平方向への流動性とを同時に評価するものであり、鉄筋間隔を変えたり、投入速度を変えることによって両者のバランスは変わる。また、これらの試験では、コンクリートを少しずつ投入するので、後から打込まれたコンクリートの圧力によって前に打込まれたコンクリートが動く様子や既に打込まれたコンクリートが動けないためにその上を乗り越えて移動の様子が観察できる。つまり、実際の施工に近い状況を観察することができるのが、これらの方法の特徴である。ただし、実施工に比べるとコンクリートに作用する圧力が小さいこと、コンクリート量が比較的多い(約40ℓ)こと、試験の手間が掛かることが欠点である。

### (3) 間隙通過試験

図-5に示す試験は、鉄筋メッシュを鉛直方向にコンクリートを通過させることによって、コンクリートの自重による鉄筋の間を通過する能力を評価する方法であ

る<sup>6)</sup>。なお、通過率100%の場合には、その通過速度も評価項目に入れることによって、さらに自己充填性の高いコンクリートを定量的に評価できる。

鉄筋間におけるコンクリートの閉塞は、コンクリート中のモルタルの変形性不足、又は粗骨材のかみ合いによるアーチング作用によって生じる。初期のコンクリート高さを変化させると両者のバランスが変わるため、初期高さを高くしたり、圧力をかけることによって、モルタルの変形性不足による閉塞を生じにくくできる。メッシュ間隔及び鉄筋直径によって、コンクリート通過率ならびに通過速度は変化する。したがって、適切な鉄筋間隔等を設定することによって実際の施工状況に応じたコンクリートの充填性を評価できる。コンクリート量が比較的多い(約30ℓ)こと、通過率の測定に手間が掛かることが欠点である。

図-6に示す平行鉄筋の通過試験<sup>7)</sup>は、図-5に示す鉄筋メッシュの通過試験を改良した試験方法である。この試験は型枠内における実際のコンクリートの動きが、大部分2次元であることを考慮し、メッシュの代わりに鉄筋を平行に配置して、コンクリート量(約20ℓ)を減らした試験方法である。したがって、鉄筋メッシュの通過試験との相関は高く、同径の鉄筋を用いた場合、35mm間隔の平行鉄筋はほぼ50mmのメッシュに相当することが実験によって、確かめられている。平行鉄筋の通過試験も鉄筋メッシュの通過試験と同様に鉄筋間隔及び鉄筋直径によって、通過率ならびに通過速度は変化する。したがって、適切な鉄筋間隔等を設定することによ

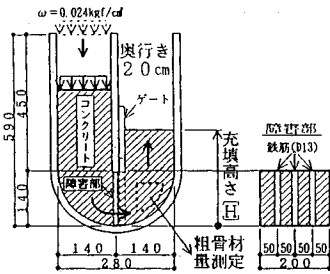


図-7 U型充填性試験装置<sup>8)</sup>

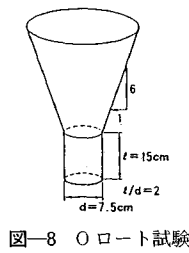


図-8 Oロート試験

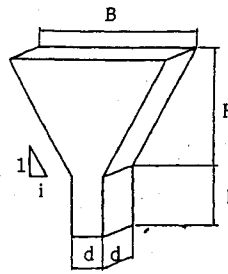


図-9 ロート試験装置

表-1 ロート試験装置の形状

No.	i	d	B	H	l
1	0.5	7.5	37.5	30.0	15.0
2	1.0	7.5	52.5	22.5	15.0
3	2.0	7.5	73.5	16.5	15.0
4	1.0	5.0	67.0	31.0	15.0
5	1.0	10.0	43.0	16.5	15.0

(単位:cm)

て実際の施工状況に応じたコンクリートの充填性を評価できる。

図-7に示すU型充填試験<sup>8)</sup>は、図-5の鉄筋通過試験をさらに応用した試験であり、投入側のコンクリート高さや鉄筋を通過した側のコンクリートの高さの差によって充填性を評価できる。鉄筋の障害物前後でのコンクリートの圧力差は、図-5や図-6に比べて小さい。したがって、障害物近傍でのコンクリートの変形速度は、初期高さが同じ場合小さくなる。そのため、同じ間隙寸法でもコンクリートの通過しやすさは、図-5や図-6と若干異なる可能性もある。測定が比較的容易であることが利点である。

#### (4) ロート試験

Oロート試験<sup>9)</sup>は、図-8に示すように、円形断面を有するロートにおいて断面変化部におけるコンクリートの変形速度を測定して、コンクリートの自己充填性及び性状の一部を評価しようとするものである。この試験はフレッシュな状態のペーストやモルタル等の粘性を測定するJロートやPロートを応用したものであり、コンクリートの見掛けの粘性を測定することを主眼に考案された試験であると考えられる。

### 3. ロート試験の開発

フレッシュコンクリートの自己充填性を評価するためにスランプフローで代表される変形性の他に鉄筋等の障害物の間をコンクリートが通過する際の通過しやすさを評価する必要がある。自己充填性を評価する試験方法の一つとして、ロートの中をコンクリートが流下する際の変形速度を測定する方法の開発を試みた。ロート試験は、前述のように従来ペーストやグラウト材等に対しての見掛けの粘性を測定することを目的に使われていたのに対し、著者らは間隙の通過しやすさを簡易に評価する試験、つまり、前述の鉄筋間を通過させる試験の延長としてロート試験を行うことを考えた。すなわち、コンクリート中に含まれる固体粒子の大きさとロートの寸法の関係が、従来のペーストやグラウト中に含まれる粉体粒子の大きさとロートの寸法の関係とは異なるものとしてロート試験を考えたのである。

開発にあたっては、まずロートの形状がコンクリートの変形速度に及ぼす影響を把握することを試みた。次いで、ロートの形状を一定とした場合において、コンクリートの配合条件がコンクリートの変形速度に及ぼす影響を把握し、鉄筋等の障害物の間隙をコンクリートが通過する際の通過しやすさを的確に評価できる形状について検討した。コンクリートの変形速度を間接的に評価する試験としてロート試験を考え、試験から得られる流下速度を用いて評価することを試みた。

#### (1) ロートの形状の影響

従来のロート試験は一般に円形断面を用いており、コンクリートは三次元的に変形する。しかし、型枠内でコンクリートが鉄筋等の障害物を通過する場合、コンクリートは主として二次元的に変形する。そこで、ロート試験装置を図-9に示すように二次元の変形を強制的に与える方法を考えた。この装置を用いて、ロート内にコンクリート試料をロート天端まで入れた後、下部の吐出口を開放することによってコンクリートが流出するのに要する時間(流下時間)を測定した。流下時間は、吐出口の開放時から、ロートの上部より観察して吐出口から下の空間が見えるまでの時間とした。流下させるコンクリート容積を吐出口の断面積と流下時間で除すことによって平均流下速度を算定した。試験は、ロートの勾配*i*と吐出口の径*d*を要因とし、表-1に示す5種類の形状のロート(木製、容量は6*l*一定)について行った。試験には、モルタルの配合を一定(落下振動を与えないモルタルフロー260mm、Jロートの流下時間80秒)とし、最大寸法20mmの粗骨材を用いてその使用量を変化させた5配合のコンクリートを用いた。使用材料を付表-1に、試験に供したコンクリート配合を付表-2にそれぞれ示す。ここで、*G/G<sub>lim</sub>*は、コンクリート中における粗骨材量の実積率に相当する量に対する容積比率であり、*S/S<sub>lim</sub>*は、モルタル中における細骨材量の実積率に相当する量に対する容積比率である。また、練りませ方法については付録に示すとおりである。付表-2において、粗骨材使用量の最も大きいもの(*G/G<sub>lim</sub>*=60%)及びモルタルを除いては締め固め不要の自己充填コンクリートと考えられるコンクリートである。

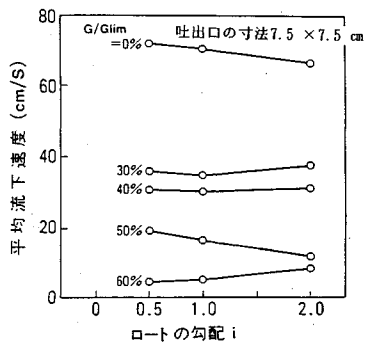


図-10 ロートの勾配と平均流下速度の関係

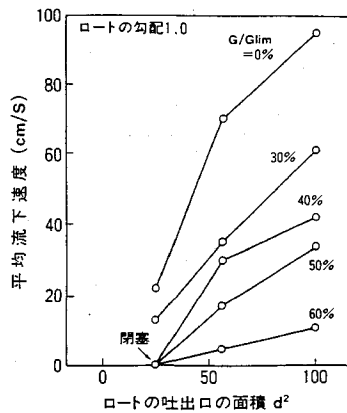


図-11 吐出口の面積と平均流下速度の関係

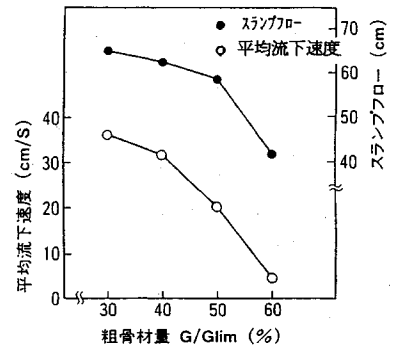


図-12 粗骨材量 G/Glim と平均流下速度、スランプフローの関係

図-10 より吐出口の寸法が  $7.5 \times 7.5$  cm の場合、ロートの勾配が  $0.5 \sim 2.0$  の範囲では、いずれのコンクリートにおいてもロートの勾配にかかわらず平均流下速度はほぼ同じ結果となった。ただし、ロートの勾配が大きいほど傾斜側面付近のコンクリートが遅れて流下する傾向にあり、コンクリート全部が通過する時間を正確に測定することが困難であった。これに対して、吐出口の大きさが平均流下速度に及ぼす影響は大きく、図-11 に示すように吐出口の面積  $d^2$  が大きいほど平均流下速度は大きくなった。コンクリートを粗骨材とモルタルの二相系材料として考えると、コンクリートの平均流下速度に影響を及ぼす要因としては、モルタルの変形速度、粗骨材粒子どうしの接触摩擦等の干渉及びコンクリートとロートの摩擦が考えられる。吐出口の一辺の長さが  $7.5$  cm と  $5.0$  cm を比較すると、コンクリート単位体積当りに接するロートの面積が  $30\%$  程度異なるのに対し、平均流下速度は  $3$  倍以上異なっている。したがって、ロートとの摩擦の違いよりも吐出口の大きさの変化に対し、モルタルの変形速度や粗骨材どうしの干渉の程度が大きく変化し、それによって平均流下速度が変化するものと判断できる。

## (2) コンクリートの配合条件の影響

ここでの試験では、前述のロートの形状の影響を検討した結果を踏まえて、測定しやすい及びコンクリートの種類が広い範囲で閉塞せず定量的に測定できることを考慮して、ロート試験の勾配を  $0.5$ 、吐出口の一辺の長さを  $7.5$  cm とし、さらに測定誤差を少なくするためコンクリートの容量を  $10$  l に増やしたロート試験 ( $i=0.5$ ,  $d=7.5$  cm,  $B=50$  cm,  $H=42.5$  cm,  $l=15$  cm, ステンレス製; 以下、V型ロート試験と呼称する) を用いることとした。

V型ロート試験によって測定される平均流下速度に影響を及ぼす配合要因としては、モルタル及び粗骨材の質と量が考えられる。そこで、粗骨材量がコンクリート

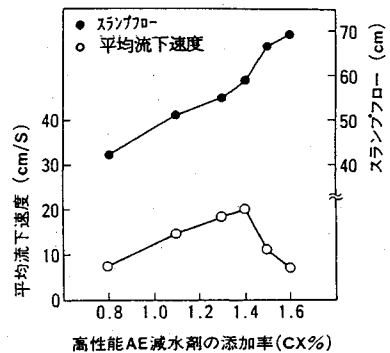


図-13 高性能 AE 減水剤の添加量と平均流下速度、スランプフローの関係

の平均流下速度に及ぼす影響を把握するため、モルタルの質を一定とし、粗骨材量を変化させることによってスランプフローを変化させたコンクリートについて試験を行った。また、モルタルの質の影響を把握するため、粗骨材量及びモルタル量を一定とし、高性能 AE 減水剤の添加量だけを変化させることによってモルタルの質を変化させスランプフローを変化させたコンクリートについて試験を行った。さらに、水粉体体積比を変化させることによってモルタルの質を変化させ、高性能 AE 減水剤の添加量によってスランプフローを  $60 \pm 3$  cm 一定としたコンクリートについて試験を行った。試験に供したコンクリートの配合を付表-3 に示す。

モルタルの質を一定とし、粗骨材量  $G/Glim$  を変化したコンクリートでは、図-12 に示すように  $G/Glim$  が大きくなるにしたがってスランプフローが小さくなり、V型ロート試験の平均流下速度も小さくなった。 $G/Glim$  を大きくすることでモルタル量が少なくなり、スランプフローが小さくなるとともにロート中で粗骨材どうしの干渉が大きくなったためであると考えられる。

これに対し、粗骨材量及びモルタル量を一定とし高性能 AE 減水剤の添加量を変化させたコンクリートでは、

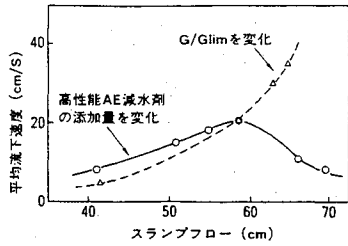


図-14 スランプフローと平均流下速度の関係

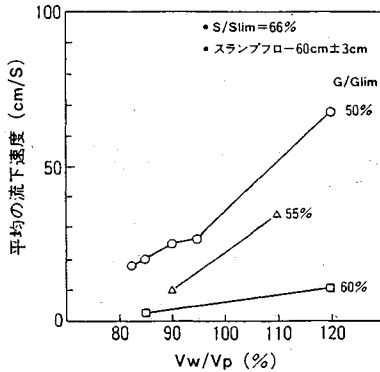


図-15 水粉体体積比と平均流下速度の関係

図-13に示すように高性能 AE 減水剤の添加量の増大とともにスランプフローは大きくなったが、V型ロートの平均流下速度は最大となる高性能 AE 減水剤の添加量のあることが認められた。この試験に供したコンクリートでは、スランプフローが40~60 cm程度まではコンクリートの平均流下速度が大きくなるのに対し、スランプフロー60 cm以上となるとモルタルの変形性が大きくなりすぎて粗骨材どうしが接触することによる干渉が卓越してくるため平均流下速度が遅くなるものと考えられる。

図-14は、横軸にスランプフロー、縦軸に平均流下速度とした図に両試験結果をプロットしたものである。ここで、 $G/G_{lim}$ を変化させたコンクリートでスランプフローを60 cm以上としたものは締固め不要の自己充填コンクリートとして充填性が高いものであるのに対し、高性能 AE 減水剤の添加量を変化させてスランプフローを65 cm以上としたものは充填性が低いものであることを確認しており、これらの差異をロート試験の平均流下速度で評価できることが示されたのである。

図-15に示すように、水粉体体積比が80~120%の範囲で高性能 AE 減水剤の添加量を調整することによりスランプフローを60±3 cm一定とした場合、水粉体体積比が大きいくほど平均流下速度は大きくなる。その傾向は、粗骨材量が少なくて顕著である。粗骨材量が少なくてコンクリートほど、平均流下速度へのモルタルの特性の影響が大きくなるため、水粉体体積比の変化に対し

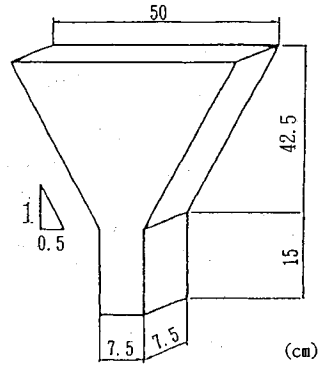


図-16 V型ロートの形状・寸法

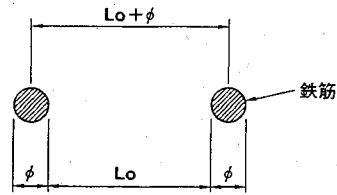


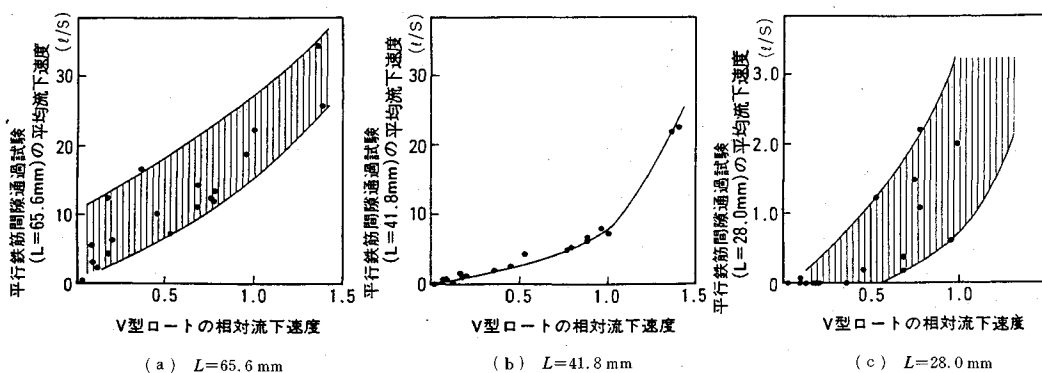
図-17 鉄筋と鉄筋間隔

て平均流下速度が大きく変化したのである。それに対して、粗骨材量が多いコンクリートでは粗骨材どうしの干渉の影響が大きくなるため水粉体体積比が大きくなっても平均流下速度はあまり速くならない。

このように、V型ロートの平均流下速度は、粗骨材量が少ない場合に速くなり、モルタルの変形速度が大きい場合にも速くなる。モルタルの変形速度が大きくなりすぎると粗骨材どうしの干渉が大きくなり、平均流下速度が小さくなることもある。したがって、間隙の通過のしやすさを評価する場合、平均流下速度は比較的速い方がよいものと考えられる。同一のスランプフローであってもV型ロート試験の平均流下速度はコンクリートの配合条件によって異なっており、この流下速度を測定することによってモルタルの特性だけでなく骨材どうしの干渉の程度をも評価でき、フレッシュコンクリートの自己充填性を評価する一方法として有効であるものと考えられる。

### (3) V型ロート試験の提案

前述の検討結果を基にして、図-16に示すV型ロートを用いた試験をコンクリートの間隙通過のしやすさを評価する試験方法の一つとして提案する。よりの確に自己充填性を評価するためには、ロート試験のこう配及び吐出口の大きさは、充填しようとする部位によって変化させる必要がある。しかし、一般的な充填性の評価試験を考えた場合、測定のしやすさ及びコンクリートの種類が広い範囲で閉塞せず定量的に測定できることを考慮して、ロート試験の勾配を0.5、吐出口の径を7.5 cmとした。試験の測定方法は、3章(1)に示したとおりで



図—18 V型ロートの相対流下速度と鉄筋間隙通過試験の平均流下速度の関係

ある。試験値の評価は、同一試料のコンクリートを用いて3回連続で測定し、その平均値によって行うこととした。

#### 4. ロート試験による自己充填性評価とその検証

スランプフロー及びロート試験の流下速度によって自己充填性を評価できるか否かを検証するためには、評価するコンクリートの充填性を何らかの方法で試験し確認する必要がある。そこで、V型ロート試験の流下速度が、どの程度の間隙の通過のしやすさを評価しているかを確認するため、平行鉄筋の間隙通過試験をV型ロート試験とともに行った。ついで、鉄筋が密に多数配置されている型枠内に充填する試験を行い、その試験結果を基に、スランプフロー及びV型ロート試験の流下速度によって自己充填性を評価できるか否かを検証した。

ここで、スランプフロー及びV型ロートの流下速度をそれぞれスランプフロー60 cm、流下時間5秒で無次元化した値を用いることとした。次式に相対フロー面積 $A_f$ 及び相対流下速度 $R$ を示す。

$$\text{相対フロー面積 } A_f = (SF/60)^2$$

ここで、 $SF$ ：対象とするコンクリートのスランプフロー (cm)

$$\text{相対流下速度 } R = 5/V$$

ここで、 $V$ ：対象とするコンクリートの流下時間 (s)

##### (1) V型ロート試験と間隙通過試験の関係

V型ロート試験の流下速度がコンクリートの間隙通過のしやすさを評価できるとすると、どの程度の間隙の通過のしやすさを評価しているかを確認する必要がある。そこで、平行鉄筋の間隙通過試験を行い、図—6に示す容器の中にコンクリートを高さ60 cmまで投入し、その後下面を開放することによってコンクリートを流下させ、その流下時間を測定した。鉄筋間隔を81 mm、56 mm、41 mm (鉄筋径19 mm)に変化させ、それぞれのケースについてV型ロート試験との比較を行った。

ここで、鉄筋間隔は次式に示す相対間隔によって評価した(図—17参照)。相対間隔は、鉄筋の純間隔 $L_0$ と、鉄筋の純間隔と鉄筋間の距離の比 $L_0/(L_0+\phi)$ の積で表され、鉄筋径の大小の影響も考慮したものである。鉄筋径19 mmを用いた場合、純間隔81 mm、56 mm、41 mmの相対間隔はそれぞれ65.6 mm、41.8 mm、28.0 mmとなる。

$$\text{相対間隔 } L = L_0^2 / (L_0 + \phi)$$

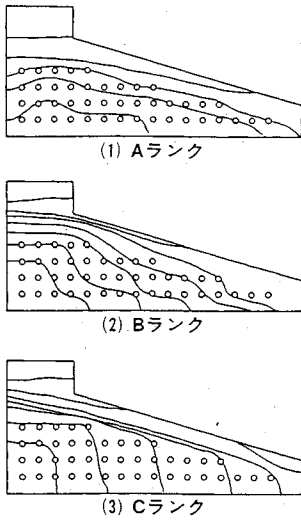
ここで、 $L_0$ ：鉄筋純間隔

$\phi$ ：鉄筋径

使用材料及び物性値は付表—1に示すとおりである。コンクリートの配合については比較的広い範囲で評価試験ができるように $V_w/V_p = 72.5 \sim 180\%$ 、 $G/G_{lim} = 50 \sim 60\%$ 、 $S/S_{lim} = 50 \sim 75\%$ の範囲(配合数：19ケース)とした。また、水中不分離性コンクリートについても試験を行った。試験に供したコンクリートのスランプフローは38.5～71.5 cmであった。試験に供したコンクリートの配合を付表—4に示す。

図—18にV型ロート試験の相対流下速度と平行鉄筋間隙通過試験の流下速度の関係を示す。図に示すように、相対間隔65.6 mm、41.8 mm、28.0 mmともに、V型ロート試験の相対流下速度が大きくなると、間隙通過試験の流下速度も増大する結果となった。相対間隔65.6 mm及び28.0 mmでは、V型ロート試験の相対流下速度と間隙通過試験の流下速度の関係は、ある幅を持ち、1対1の関係で表せない結果である。これに対し、相対間隔41.8 mmではV型ロート試験の相対流下速度と間隙通過試験の流下速度はほぼ1対1の関係となり、1本の線によってその関係を表すことができる。

このことより、V型ロート試験の相対流下速度は、間隙通過のしやすさにおいて、間隙通過試験の相対間隔40 mm程度の間隙を通過する性状を定量的に評価しているものと考えられる。しかし、V型ロートの相対流下速度が同じコンクリートでも、異なる間隔を持つ平行鉄筋間隔を通過させて得られる流下速度は、配合が変わ



図—19 高密度配筋充填性試験における各ランク

れば異なる場合があることを意味している。

(2) 鉄筋が密に多数配置されている型枠内に充填する試験による検証

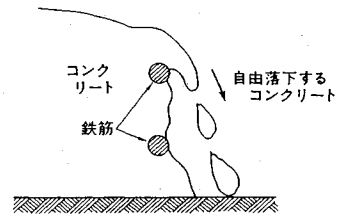
鉄筋が密に多数配置されている型枠内に充填する試験を用いてV型ロート試験によるコンクリートの評価の検証を行った。この試験は、コンクリートが狭い鉄筋間を鉛直及び水平方向に通過する能力と水平へ流動する能力を同時に評価するものであり、一般の構造物に比べるとかなり厳しい状況を再現している。

試験は、図—3に示すφ18mmの塩ビ管を32mm間隔で配置した試験装置の片側からコンクリートをカップ状の容器(容量3l)によって約0.5l/sの速度で投入し、コンクリートの流動状況及び投入終了後の鉄筋回り等の充填状況を観察した。ここで、鉄筋間隔32mm、径18mmは、相対間隔20.5mmに相当する。

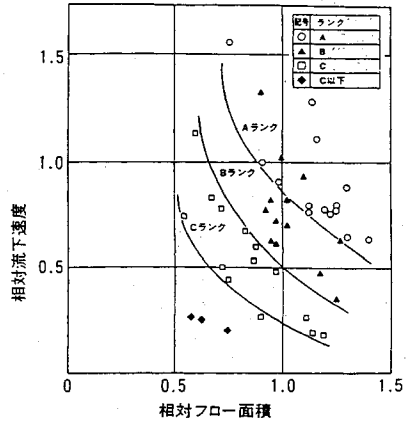
自己充填性の評価指標として、流動状況及び充填状況をビデオに録画し、その観察結果より、各々のコンクリートの充填性能をAランク、Bランク及びCランクの3つのランクに分類した。ここで、Cランクのコンクリートは、自己充填コンクリートとして最低レベルのものを想定し、また、Aランクのコンクリートは、自己充填コンクリートとして最高レベルのものを想定した。各ランクの評価方法は以下のように行った。図—19に各ランクの代表的な流動状況を示す。

Aランク：下から順次コンクリートが流動し、コンクリートの圧力が全体に伝わりながら流れるもの。十分に充填したもの。

Bランク：若干上表面をコンクリートが流れるもの、流動勾配は小さく鉄筋などの障害物において図—20に示すようなコンクリートの自由落下がほとんどないもの。表面部にわずかに未



図—20 コンクリートが流動によって自由落下する状況



図—21 相対フロー面積と相対流下速度の関係

充填部(5cm<sup>2</sup>程度)ができるもののほぼ充填しているもの。

Cランク：表面だけをコンクリートが流れ、鉄筋などの障害物において図—20に示すような自由落下が認められるもの。表面部、特に流動先端部に未充填部(20cm<sup>2</sup>程度)がいくつか認められるが、ほぼ全域にコンクリートが到達しているもの。

試験に供したコンクリートの配合は、 $V_w/V_p=75\sim 120\%$ 、 $G/G_{lim}=40\sim 60\%$ 、 $S/S_{lim}=55\sim 74\%$ の範囲(配合数：49ケース)とした。配合を付表—5に示す。

図—21に相対フロー面積と相対流下速度の関係を示し、図中に高密度配筋部の充填性ランクを示す。図に示すように、相対フロー面積、相対流下速度ともに大きい場合には総じて充填ランクが高く、相対フロー面積、相対流下速度ともに小さい場合には充填ランクが低い結果となった。これらは、図において概ね、A、B、Cの各ランクに領域分けすることができる。相対フロー面積、相対流下速度のそれぞれ単独で自己充填性を評価することはできず、同一の自己充填性を示す領域はフローが大きいほど流下速度は遅く、フローが小さいほど流下速度は速い傾向にある。

しかし、Aランクの領域にもBランクのコンクリートが存在しており、相対フロー面積と相対流下速度だけでは、図—3に示す高密度配筋充填性試験で代表される自己充填性を的確に評価できない場合がある。高密度配

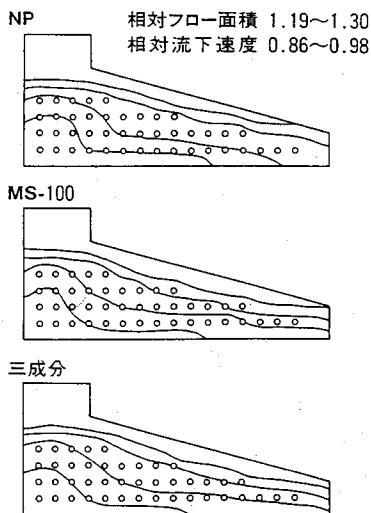


図-22 粉体の種類、水粉体積比が異なるコンクリートの充填性

筋充填性試験の塩び管の相対間隔が 20.5 mm と極めて小さいため、V型ロート試験の相対流下速度が同じであっても相対間隔が 20.5 mm の間隙通過のしやすさはコンクリートの配合によって異なる場合があることを示している。

粗骨材の最大寸法が 20 mm の場合、スランプフロー試験から得られる最大値は 70 cm (相対フロー面積 1.36) 程度、V型ロート試験の流下時間の最小値はコンクリートの流動性によって異なるが 3 秒 (相対流下速度 1.67) 程度である。なお、水の流下時間は 0.2 秒程度である。V型ロート試験の相対流下速度が大きい場合には、充填性の良くないものも存在するが、充填性の高いコンクリートは、限界値の範囲で、スランプフローが比較的大きく、V型ロート試験の相対流下速度が比較的大きい。

図-22 は、細骨材及び粗骨材の品質、単位量を一定とし、粉体の種類、水粉体積比及び混和剤の添加量を変化させて相対フロー面積を 1.19~1.30、相対流下速度を 0.86~0.98 と両者をほぼ同じにした 3 種類のコンクリートについて高密度配筋充填性試験の結果を比較したものである。粉体として、普通ポルトランドセメント単身 (NP)、中庸熟ポルトランドセメントと石灰石微粉を重量比 95 : 5 で混合したもの (MS-100) 及び普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを重量比で 30 : 30 : 40 で混合したもの (三成分) の 3 種類を用いた。図に示すように、3 ケースともに自己充填性は、ほぼ同じであった。このことは、骨材の品質、単位量が一定の場合、粉体の種類が異なっても、水粉体積比及び混和剤の添加量を調整することによってスランプフロー及び V型ロート試験による流下速度を

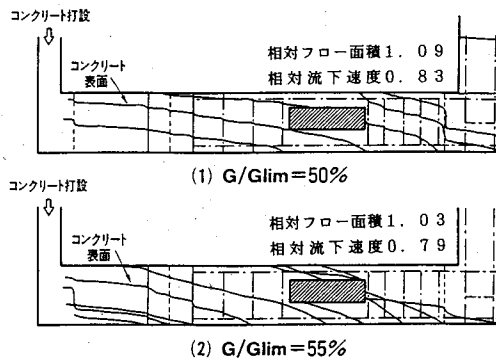


図-23 中規模流動実験におけるコンクリートの流動状況

同一にすれば自己充填性がほぼ同じコンクリートを作成できることを意味する。

粗骨材量が異なるコンクリートについて、相対フロー面積と相対流下速度が同じ場合の高密度配筋充填性試験の結果について比較した。その結果、粗骨材量  $G/G_{lim}$  50% の方が  $G/G_{lim}$  55% よりも充填性が良い結果となり、相対フロー面積と相対流下速度が同じであっても充填性が異なるコンクリートのあることが明らかになった。この 2 つのコンクリートを用いて図-23 に示す中規模流動実験<sup>7)</sup>を実施した。図に示すようにコンクリートの流動距離、流動勾配が異なり、コンクリートの充填性能に差があるため最終充填状況に差が認められた。高密度配筋充填性試験と同様に  $G/G_{lim}$  50% の方が  $G/G_{lim}$  55% よりも充填性が良い結果となった。これに対し、骨材の品質と量を同一にして粉体の種類及び水粉体積比を変化させ、相対フロー面積、相対流下速度及び高密度配筋部の充填性を同じにしたコンクリートは、中規模流動実験においてもほぼ同じ充填性状が得られた。

これらのことより、図-3 に示す充填性試験によって中規模流動実験のような実施工における自己充填性が概ね評価できること、自己充填性には粗骨材量が大きく影響し、相対フロー面積と相対流下速度が同じであっても自己充填性が変化する場合があることが明らかになった。

以上をまとめると、吐出口寸法 7.5×7.5 cm の V型ロート試験では、相対間隔 40 mm 程度の間隙の通過のしやすさを評価できるが、それよりも狭い間隙への通過のしやすさを評価することは困難であり、粗骨材、特にその量が異なる場合では評価が困難となる場合があることが示された。これらの解決策として、V型ロート試験と吐出口の大きさが異なるロート試験を V型ロート試験と同時にを行い、相対流下速度とその変化率によってさらに的確な自己充填性評価ができるものと考えられる。

なお、今回の試験方法の提案は、粗骨材の最大寸法が



20 mm のコンクリートを対象としたものである。粗骨材の最大寸法 40 mm のコンクリートを用いる場合にも同様の手法によって自己充填性を評価できるものと考えられるが、その場合にはロートの寸法などを検討する必要がある。

5. 結 論

コンクリートの自己充填性を支配する大きな要因である間隙通過のしやすさを評価する試験として V 型のロート試験を考案し、それによってコンクリートの自己充填性を評価することを試みた。その結論は以下のとおりである。

(1) コンクリートの間隙通過のしやすさを評価する試験方法として、コンクリートに二次元的な変形を強制的に与えるロート試験 (V 型ロート試験) を提案した。ロート試験の形状は、測定のしやすさ及びコンクリートの種類が広い範囲で閉塞せず定量的に測定できることを考慮して、勾配 0.5、吐出口の一辺の長さ 7.5 cm、コンクリート量 10 l とした。なお、今回の試験方法の提案は、粗骨材の最大寸法が 20 mm のコンクリートを対象としたものである。

(2) V 型ロート試験の流下速度は、鉄筋の相対間隔が 40 mm 程度 (鉄筋径 19 mm, 純間隔 56 mm に相当) の間隙通過のしやすさを評価するものであり、充填性の高いコンクリートは V 型ロート試験の流下速度が大きい。

(3) コンクリートの変形性をスランプフローで、また間隙通過のしやすさを V 型ロート試験の流下速度で評価した場合、この両者によって一般的な配筋部における充填性を概ね評価できることが分った。ただし、鉄筋の相対間隔が 30 mm 以下の高密度配筋部へも十分に充填するようなコンクリートを的確に評価することは困難である。

(4) 厳しい間隙条件に対する自己充填性を評価するためには、吐出口の径を適切に選定したロート試験を行うことで的確な評価ができるものと考えられる。

本研究は、東京大学岡村研究室と建設会社 13 社、混和剤メーカー 1 社の共同研究の一部であり、研究を進めるにあたって、國島正彦教授、前川宏一助教授、下村匠講師よりの確かな御助言を頂き、また、竹中土木伊藤孔一氏、大林組若松岳岳氏を初めとする受託研究員の方々より多大な御助力を頂きました。さらに、セメント及び石粉は(社)

付表-1 (1) 骨材の物理的性質

記号	種類	骨材最大寸法 (mm)	産地	表乾比重	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率
■	S 1	川砂	富士川	2.59	1.91	70.0	3.29
	S 2	川砂	富士川	2.62	2.20	66.8	3.01
■	G 1	砕石	青梅	2.71	0.60	61.0	6.69
	G 2	砕石	葛生	2.66	0.40	61.5	6.70

セメント協会に提供して頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

付表-1 (2) 粉体の物理的性質

種類	記号	製造元	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
普通ポルトランドセメント	N P	辰友セメント	3.16	3360
中熱ポルトランドセメント	M P	日本セメント	3.20	3240
フライアッシュ	F	電産コークテック	2.20	3280
高炉スラグ微粉末	S	新日鐵化学	2.91	6020
石灰石粉 (炭酸カルシウム)	L 18	期フライング・カホ	2.68	18000
	L 4	期カホ・ド	2.67	4000

MS100 : MPとL18を体積比95:5で混合したものを  
 MS60S40: MS100とSを体積比60:40で混合したもの  
 OBF1 : NP, S, Fを体積比30:30:40で混合したもの  
 MS60L40: MS100とL4を体積比60:40で混合したもの  
 OBF2 : NP, S, Fを体積比30:30:40で混合したもの  
 MS40L60: MS100とL4を体積比40:60で混合したもの

付表-1 (3) 混和剤の性質

種類	記号	主成分
高性能AE減水剤	S P 1	炭性ゾリゲン、7メチルアリルスルホン鹽及び活性硫酸ポリマーの混合物、比量 1.16~1.20
	S P 2	ポリカルボキシルエーテル系と炭素ポリマーの混合物、比量 1.04~1.06
	S P 3	高縮合トリアジン化合物、比量 1.12~1.14
増粘剤	V I	パルセルロー-ス系水溶性高分子

付表-2 ロート試験の開発に用いたコンクリート配合 (1)

No.	粗骨材の種類	細骨材の種類	粉体の種類	Vw/Vp (%)	G/Glim (%)	S/Slim (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
							水 W	粉体 P	細骨材 S	粗骨材 G		
1	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	0.0	68.0	230	733	1231	0	10.26
2	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	30.0	68.0	188	599	1007	494	8.39
3	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	40.0	68.0	174	555	932	659	7.77
4	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	50.0	68.0	160	510	857	824	7.14
5	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	60.0	68.0	146	466	782	989	6.52

付表-3 ロート試験の開発に用いたコンクリート配合 (2)

No.	粗骨材の種類	細骨材の種類	粉体の種類	Vw/Vp (%)	G/Glim (%)	S/Slim (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
							水 W	粉体 P	細骨材 S	粗骨材 G		
1	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	50.0	68.0	160	510	857	824	4.08
2	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	50.0	68.0	160	510	857	824	5.61
3	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	50.0	68.0	160	510	857	824	6.63
4	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	50.0	68.0	160	510	857	824	7.14
5	G1	S1	SP1	OBF1	85.0	50.0	68.0	160	510	857	824	7.65
6	G2	S2	SP2	MS100	85.0	50.0	66.0	171	631	799	819	13.25
7	G2	S2	SP2	MS100	90.0	50.0	66.0	176	616	799	819	11.67
8	G2	S2	SP2	MS100	95.0	50.0	66.0	182	603	799	819	10.25
9	G2	S2	SP2	MS100	120.0	50.0	66.0	203	531	799	819	6.90
10	G2	S2	SP2	MS100	90.0	55.0	66.0	168	587	765	899	11.74
11	G2	S2	SP2	MS100	110.0	55.0	66.0	186	531	765	899	7.25
12	G2	S2	SP2	MS100	85.0	60.0	66.0	155	574	728	982	11.48
13	G2	S2	SP2	MS100	120.0	60.0	66.0	184	484	728	982	5.31

付表-4 間隙通過試験に用いたコンクリート配合

No.	混和剤の種類	粉体の種類	Vw/Vp (%)	G/Glim (%)	S/Slim (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				V <sub>ロ</sub> (cm)	V <sub>ト</sub> (s)		
						水 W	粉体 P	細骨材 S	粗骨材 G				
1	SP2	MS100	85.0	60.0	66.0	155	573	728	982	10.89	54.0	40.6	
2	SP2	MS100	120.0	60.0	66.0	184	483	728	982	5.31	45.5	29.8	
3	SP2	MS100	82.5	50.0	66.0	168	640	799	819	12.80	63.0	9.5	
4	SP2	MS100	82.5	55.0	62.0	169	642	718	899	12.84	71.3	11.2	
5	SP2	MS100	110.0	55.0	62.0	195	558	718	899	7.25	63.7	5.2	
6	SP2	MS100	120.0	60.0	66.0	184	483	728	982	6.28	61.3	13.7	
7	SP2	MS100	92.5	50.0	66.0	179	607	799	819	10.32	60.06	64.5	6.6
8	SP2	MS100	180.0	60.0	62.0	219	380	684	982	19.10	2.50	57.5	276.3
9	SP2	MS100	120.0	50.0	66.0	203	531	799	819	21.24	1.50	50.5	58.0
10	SP2	OBF2	79.3	50.0	66.0	181	600	799	819	9.60	61.3	5.0	
11	SP2	OBF2	85.0	49.8	63.7	195	584	775	811	9.50	71.0	3.7	
12	SP2	OBF2	72.5	50.0	68.2	167	606	822	827	9.69	58.5	25.2	
13	SP2	OBF2	90.0	50.0	74.0	159	464	896	819	5.80	50.0	6.4	
14	SP2	OBF2	90.0	50.0	66.0	176	517	799	819	5.69	65.5	3.6	
15	SP2	OBF2	72.5	50.0	66.0	156	570	799	819	7.98	64.8	6.4	
16	SP2	OBF2	72.5	50.0	66.0	156	570	799	819	7.98	64.0	7.3	
17	SP2	MS100	110.0	60.0	70.0	168	481	773	982	6.73	45.3	28.1	
18	SP2	MS100	92.5	50.0	66.0	179	607	799	819	10.32	53.5	7.2	
19	SP3	MS100	160.0	55.0	75.0	179	350	870	899	7.00	0.538	61.3	56.9

粗骨材: G 2, 細骨材: S 2

付表—5 高密度配筋充填性試験に用いたコンクリート配合

No.	粗骨材の種類	細骨材の種類	粉体の種類	Ww/Vp (%)	G/Glim (%)	S/Sliv (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			V <sub>377</sub> (cm)	V <sub>0-t</sub> 流下時間 (s)		
							水	粉体	粗骨材				
1	G1	S1	MS100	95.0	50.0	63.0	182	603	794	827	10.25	68.5	5.1
2	G1	S1	OFB2	85.0	50.0	63.0	172	533	794	827	8.00	67.0	5.8
3	G1	S1	NP	103.0	50.0	63.0	190	581	794	827	9.88	65.5	5.8
4	G1	S2	MS100	100.0	50.0	66.0	187	587	809	827	9.98	68.5	7.7
5	G1	S2	MS100	102.5	49.8	65.0	191	585	792	824	9.95	67.8	8.0
6	G1	S2	MS100	95.8	50.3	67.1	180	588	815	832	10.00	51.3	10.1
7	G1	S2	MS100	95.8	50.3	67.1	180	588	815	832	10.00	58.8	8.1
8	G1	S2	MS100	100.0	50.0	66.0	187	587	802	827	9.98	66.3	6.5
9	G1	S2	MS100	100.0	50.0	66.0	187	587	802	827	9.98	66.8	6.3
10	G1	S2	MS100	93.6	50.4	67.1	176	591	820	833	9.98	55.9	9.3
11	G1	S2	MS100	100.0	55.0	62.0	187	587	721	911	8.80	67.1	13.4
12	G1	S2	MS100	95.0	55.0	62.0	182	603	721	911	9.05	56.3	8.4
13	G1	S2	MS100	95.0	55.0	62.0	182	603	721	911	10.25	64.9	10.6
14	G1	S2	MS100	90.0	60.0	62.0	177	616	645	992	10.65	65.4	27.7
15	G1	S2	MS100	120.0	60.0	58.0	204	532	645	992	10.64	64.0	26.6
16	G1	S2	MS100	95.0	40.0	66.0	199	657	872	661	9.86	57.1	5.0
17	G1	S2	MS100	100.0	50.0	66.0	187	587	802	827	9.98	62.8	6.1
18	G2	S2	MS100	95.0	55.0	62.0	182	603	718	899	9.02	52.1	11.3
19	G2	S2	MS100	120.0	60.0	70.0	175	458	773	982	9.16	52.0	24.6
20	G2	S2	MS100	120.0	60.0	70.0	175	458	773	982	6.87	45.8	19.0
21	G2	S2	MS100	110.0	60.0	70.0	168	481	773	982	7.70	47.6	20.0
22	G2	S2	OFB2	85.0	50.0	66.0	171	530	799	819	5.83	64.0	3.9
23	G2	S2	OFB2	80.0	50.0	66.0	165	546	799	819	6.45	68.5	5.7
24	G2	S2	OFB2	80.0	50.0	66.0	165	546	799	819	5.46	62.5	6.0
25	G2	S2	MS100	90.0	50.0	66.0	176	616	799	819	11.67	65.8	6.4
26	G2	S2	MS100	85.0	50.0	66.0	171	631	799	819	13.25	71.0	7.8
27	G2	S2	MS100	120.0	50.0	66.0	203	531	799	819	16.90	63.0	2.5
28	G2	S2	MS100	110.0	50.0	62.0	195	559	718	819	8.37	64.5	4.5
29	G2	S2	OFB2	95.0	50.0	72.0	168	464	886	819	4.18	46.5	4.4
30	G2	S2	OFB2	90.0	50.0	74.0	159	464	896	819	5.57	49.5	6.0
31	G2	S2	OFB2	90.0	50.0	74.0	159	464	896	819	6.50	54.5	7.5
32	G2	S2	OFB2	90.0	50.0	74.0	159	464	896	819	7.42	59.8	5.5
33	G2	S2	OFB2	85.0	50.0	74.0	154	477	896	819	8.59	63.8	6.6
34	G2	S2	OFB2	90.0	50.0	74.0	159	464	896	819	6.50	57.8	6.5
35	G2	S2	OFB2	80.0	50.0	74.0	159	464	896	819	5.57	44.5	6.8
36	G2	S2	OFB2	90.0	50.0	74.0	159	464	896	819	5.80	50.8	6.4
37	G2	S2	OFB2	80.0	50.0	58.0	165	546	639	819	6.01	59.0	10.4
38	G2	S2	OFB2	75.0	60.0	55.0	165	577	608	982	6.35	57.0	19.1
39	G2	S2	OFB2	80.0	60.0	58.0	165	546	639	982	6.23	63.3	19.8
40	G2	S2	MS100	92.5	55.0	62.0	179	608	718	900	10.34	68.0	6.1
41	G2	S2	MS100	95.0	55.0	62.0	182	603	718	900	9.12	59.3	6.6
42	G2	S2	MS100	92.5	55.0	62.0	179	608	718	899	9.73	60.8	6.3
43	G2	S2	MS100	92.5	50.0	66.0	179	607	799	819	10.32	62.5	5.8
44	G1	S1	MS100	100.0	50.0	65.0	172	541	819	827	8.12	59.3	6.9
45	G1	S1	MS100	110.0	50.0	65.0	180	515	815	827	7.73	62.8	5.4
46	G1	S1	MS60L40	100.0	50.0	65.0	172	509	819	827	7.64	60.0	4.9
47	G1	S1	MS60S40	100.0	50.0	65.0	172	525	819	827	7.88	58.5	6.1
48	G1	S1	MS60S40	110.0	50.0	65.0	180	500	819	827	7.50	60.8	6.1
49	G1	S1	MS40L60	100.0	50.0	65.0	172	492	819	827	7.38	56.8	3.8

混和剤：SP2

(コンクリートの練りませ方法)

上段のモルタル用ミキサ (パン型強制練り, 容量 30 l) と下段のコンクリート用ミキサ (2軸強制練り, 容量 50 l) よりなる二段式ミキサを用いた。まず、上段ミキサに粗骨材以外の材料

(水, 混和剤, 粉体, 細骨材) を投入し, 90 秒間練りませた。練りませたモルタルに粗骨材を投入し, 下段ミキサでさらに 90 秒間練りませた後, コンクリートをミキサより排出し, 各種試験に供した。コンクリートの練りませ量を 50 l とした。

参考文献

- 1) 小沢一雅・前川宏一・岡村甫：ハイパフォーマンスコンクリート—コンクリート構造物の信頼性向上に最も有効な材料—, 土木学会誌, 1989. 4.
- 2) 例えば, 岡村甫・小沢一雅：(解説) 締固め不要コンクリートの可能性と課題, コンクリート工学, Vol. 30, No. 2, 1992.
- 3) 藤田信一他：大規模地下連続壁のコンクリートに関する実験的研究, 土木学会論文集 No. 435/IV-15, 1991. 9.
- 4) Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M. and Okamura, H.: High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structure, Proc. of the Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Chiang-Mai, Jan. 1989.
- 5) 坂田昇他：高流動コンクリートの充填性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, 1990.
- 6) 小沢一雅・前川宏一・岡村甫：ハイパフォーマンスコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, 1989.
- 7) 伊藤孔一・小沢一雅：実構造物を模擬したモデル装置による締固め不要コンクリートの充填性評価, 超流動コンクリートに関するシンポジウム論文集, 1993. 5.
- 8) 新藤竹文他：超流動コンクリートの基礎物性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, 1991.
- 9) 近松竜一他：O ロート流下試験による高流動コンクリートの流動性の評価, コンクリートの製造システムに関するシンポジウム論文集, 1992.

(1993. 3. 16 受付)

EVALUATION OF SELF-COMPACTABILITY OF FRESH CONCRETE USING THE FUNNEL TEST

Kazumasa OZAWA, Noboru SAKATA and Hajime OKAMURA

The objective of this research is to establish the test method for self-compactability of fresh concrete, which is inevitable in mix design and manufacturing of self-compactable concrete. The V-type funnel test is proposed for evaluating the flowability through small openings, which is one of the most important properties of self-compactable concrete. It is experimentally verified that self-compactability of fresh concrete placed for usual arrangement of reinforcement in the formwork can be evaluated by deformability obtained from slump-flow test and flowability through small openings obtained from V-type funnel test.